



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**NÁVRH VÝROBY POUZDRA ANALOGOVÝCH HODINEK**

DESIGN FOR PRODUCTION OF ANALOG WATCH CASE

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Daniel Vilímovský**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.**

**BRNO 2019**

## Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Daniel Vilímovský**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojírenského inženýrství  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.**  
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### Návrh výroby pouzdra analogových hodinek

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem bakalářské práce bude stručné představení hodinářského průmyslu a charakteristika technologie Rapid Prototyping se zaměřením na aditivní metodu Direct Metal Laser Sintering. Model pouzdra hodinek bude navržen a zkonstruován ve 3D parametrickém programu Autodesk Inventor a následně vyroben z kovového prášku na 3D tiskárně. Součástí práce bude rovněž kompletace včetně osazení pouzdra hodinovým strojkem. Práce bude ukončena technicko-ekonomickým zhodnocením a porovnáním s komerční výrobou produktu (aktuálně používanými metodami výroby).

#### Cíle bakalářské práce:

- Teoretická část (charakteristika hodinářského průmyslu).
- Charakteristika technologie Rapid Prototyping (aditivní metoda Direct Metal Laser Sintering).
- Experimentální část (návrh, výroba a sestavení pouzdra hodinek).
- Technicko-ekonomické zhodnocení.

#### Seznam doporučené literatury:

GAZELEY, W. J. Clock and Watch Escapements. New York: Van Nostrand Reinhold, c1992. 304 pp. ISBN 978-07-090-4738-4.

POOK, L. P. Understanding Pendulums: A Brief Introduction. Dordrecht: Springer, c2011. 133 pp. ISBN 978-94-007-1414-4.

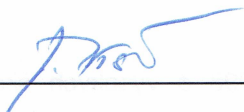
CHUA, C. K., LEONG, K. F., LIM, C. S. Rapid Prototyping: Principles and Applications. 3rd ed. New Jersey: World Scientific, c2010. 512 pp. ISBN 978-981-277-897-0.

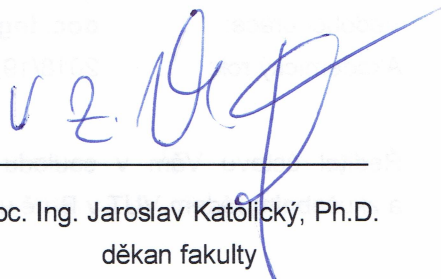
BENIAK, J. Systémy rapid prototyping. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, c2014.  
134 s. ISBN 978-80-227-4287-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19.

V Brně, dne 26. 10. 2018



  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Jaroslav Katolícký, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je stručné představení hodinářského průmyslu a charakteristika aditivní technologie Rapid Prototyping. Praktická část je zaměřena na tvorbu modelů jednotlivých komponent hodinek ve 3D parametrickém programu Autodesk Inventor a jejich následnou výrobu různými metodami na 3D tiskárně. Součástí práce je také kompletace hodinek, včetně osazení pouzdra hodinkovým strojkem. Práce je zakončena technicko-ekonomickým zhodnocením a porovnáním s aktuálně používanými metodami výroby.

### Klíčová slova

hodinky, Rapid Prototyping, modelování, výroba, SLM, PolyJet

## ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis is a brief introduction to the watch industry and the characteristics of Rapid Prototyping. The practical part is focused on creating models of individual watch components in 3D parametric program Autodesk Inventor and following production by various methods on 3D printer. Part of the thesis is also assembly, including the watch movement installation. The thesis is concluded with a technical-economic evaluation and comparison with currently used production methods.

### Key words

watch, Rapid Prototyping, modeling, production, SLM, PolyJet

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VILÍMOVSKÝ, Daniel. *Návrh výroby pouzdra analogových hodinek*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117300>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Návrh výroby pouzdra analogových hodinek** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....  
Datum

.....  
Daniel Vilímovský

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Josefu Sedlákov, Ph.D. za odborné vedení mé bakalářské práce. Dále děkuji panu Janu Pokornému a Ing. Marku Pagáčovi, Ph.D. za spolupráci při zpracování praktické části této práce. Také bych tímto chtěl poděkovat své rodině za podporu během celého bakalářského studia.

---

**OBSAH**

ABSTRAKT .....	3
PROHLÁŠENÍ .....	4
PODĚKOVÁNÍ.....	5
OBSAH.....	6
ÚVOD .....	7
1 TEORETICKÁ ČÁST .....	8
1.1 Hodinky .....	8
1.1.1 Historie hodinek .....	8
1.1.2 Rozdělení hodinek .....	10
1.1.3 Hlavní části hodinek.....	10
1.2 Aditivní technologie Rapid Prototyping.....	14
1.2.1 Etapy výroby .....	15
1.2.2 Přehled metod.....	15
2 PRAKTICKÁ ČÁST .....	20
2.1 Tvorba modelu .....	20
2.1.1 Design hodinek .....	20
2.1.2 Dimenzování hodinek.....	20
2.1.3 Modelování hodinek.....	21
2.2 Výroba dílů .....	25
2.2.1 Tisk na SLM zařízení .....	26
2.2.2 Tisk na PolyJet zařízení .....	26
2.2.3 Dokončovací operace .....	27
2.3 Montáž hodinek.....	27
3 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ .....	28
3.1 Výrobní náklady .....	28
3.2 Srovnání s aktuálně používanými výrobními metodami .....	28
ZÁVĚR .....	29
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	30
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	32

## ÚVOD

Již řadu let se pouzdra hodinek vyrábí frézováním a soustružením. Polotovarem pro výrobu je tyč, ze které se oddělí potřebná délka, upne se do svěráku či upínky a třískovým obráběním se vytvoří požadovaný tvar. Tento způsob výroby doprovází velké množství odpadního materiálu ve formě třísek, se kterými jsou spojeny další náklady na jejich zpracování a transport. Vysoké náklady tvoří také pořízení speciálních řezných nástrojů, procesní kapaliny, upínek atd. Celý proces je víceoperační, je nutné připravit polotovar, který vyžaduje transport, manuální upínání a přeupínání do stroje. Je zde tedy nutná přítomnost obsluhy.

Hlavním cílem této práce je návrh výroby hodinek novým způsobem, který by všechny výše zmíněné vlivy dokázal eliminovat. Pro výrobu byla zvolena metoda Rapid Prototyping, známá také jako 3D tisk. V současnosti není 3D tisk používán pouze pro vizualizaci, ale nabízí urychlení vývojové etapy a výrobu plně funkčních dílů, které nachází uplatnění ve strojírenském průmyslu, stavebnictví, medicíně a marketingu. Úkolem je zjistit, zda je výroba hodinek touto technologií vůbec možná.

V říjnu 2018 byl proveden průzkum na veletrhu Salon Exceptional Watches, který je největším veletrhem luxusních hodinek ve střední a východní Evropě, a bylo zjištěno, že žádný ze zúčastněných výrobců tuto technologii zatím nevyužívá a o tisku z kovu vůbec nevědí. Proto dalším účelem této práce je poznání celého procesu od návrhu po výrobu a přiblížení této možnosti výrobcům.



## 1 TEORETICKÁ ČÁST

Teoretická část této práce je zaměřena na přiblížení hodinek včetně stručné historie, základního rozdělení a popisu jejich hlavních částí. Druhou částí této kapitoly je popis technologie Rapid Prototyping, postup při výrobě dílů touto technologií a přehled několika metod včetně jejich charakteristiky.

### 1.1 Hodinky

Hodinky jsou malé přenosné zařízení primárně určené k ukazování aktuálního času, které ovšem mohou mít i několik dalších funkcí. Jsou schopné informovat například o aktuálním datu, dnu v týdnu, fázi měsíce a mohou mít chronometr, což je v hodinářství používaný výraz pro stopky. V současnosti velmi oblíbené chytré hodinky jsou schopné částečně nahradit i chytrý mobilní telefon s většinou jeho funkcí, od telefonování přes prohlížení internetu až po provádění bezkontaktních plateb. Hodinky už ovšem nejsou používány pouze k účelům, ke kterým byly původně vytvořeny. Postupem času se staly módním doplňkem, předmětem společenské reprezentace a prestiže, proto se při jejich výrobě začaly používat také velmi drahé a vzácné materiály. Jedním takovým zajímavým a neobvyklým materiálem je například meteorit. Tato tendence zapříčinila, že se hodinky staly předmětem investic. Modely od celosvětově známých značek s dlouhou tradicí totiž neztrácí svou hodnotu. Kvalitní mechanické hodinky se těší velké oblibě sběratelů, které těší technická dokonalost a krása mechanických strojků, důmyslná konstrukce a podobně.

#### 1.1.1 Historie hodinek

Historie hodinek sahá až do 16. století, kdy vznikly první přenosné hodinky (viz obr. 1.1). Měly vejčitý tvar pouzdra vyrobeného z bronzu, do kterého byly vyryté různé ornamenty, a jednu hodinovou ručičku. Podle svého tvaru a místa výroby se označovaly jako Norimberské vejce. Byly nošené na krku a musely se dvakrát denně natahovat. Poháněla je ocelová pružina a oscilátorem byl lihýř (vodorovné kyvadlo). Jejich chod byl ovšem velmi nerovnoměrný, protože síla hnací pružiny postupně klesala a nedokázala udržet neměnnou frekvenci oscilátoru. Časem se hodináři naučili tento problém částečně kompenzovat miniaturním řetízkem a šnekem, který se slábnutím rozvíjející se pružiny měnil rameno působící síly. Velké zlepšení pohonu přinesla až setrvačka s lépe definovanou vlastní frekvencí [1].



Obr 1.1 Norimberské vejce [2].

S rozvojem mořeplavby a navigace v 18. století vznikla potřeba dlouhodobě přesných a spolehlivých hodinek, které by umožnily přesnější určení zeměpisné polohy. Roku 1759 sestrojil lodní tesař John Harrison první použitelný model chronometru s úplně novým krokovým mechanismem, kterým se chod znatelně zlepšil [3]. Za stejným účelem vznikl tourbillon, složitě a důmyslně uspořádaní setrvačky v kleci, která se neustále pomalu otáčí a vyrovnává tak nerovnoměrnost chodu v různých polohách. Pro snížení tření v čepech se začala vyrábět ložiska z rubínů. Kvalitní hodinky s velmi tenkými čepy setrvačky byly velmi choulostivé vůči nárazům. Proto se začalo zavádět pružné uložení ložisek setrvačky.

Od poloviny 19. století se rozběhla tovární výroba spolehlivých a stále levnějších hodinek, zejména ve Švýcarsku, pak také v Německu a USA.

Roku 1904 vyrobila firma Cartier pro brazilského letce první náramkové hodinky, které od 1. světové války rychle nahradily hodinky kapesní. Byly opatřeny páskem nastavitelné délky, aby vůle hodinek na zápěstí vyhovovala nositeli. Svou velikostí a hmotností byly uzpůsobeny k nošení na zápěstí. Jsou konstruovány tak, aby odolávaly silnějším ořesům. Ve 20. letech se začaly vyrábět hodinky s automatickým natahováním, nejčastěji excentrickým segmentem (rotor), který se při pohybu ruky otáčí a natahuje pero. V roce 1931 si nechala patentovat systém automatického nátahu firma Rolex [4].

V 60. letech vznikly první přenosné elektronické hodinky, které začala hromadně vyrábět japonská firma Seiko. Svou přesností, spolehlivostí i cenou si postupně našly mnoho příznivců. Hromadná výroba elektronických součástek zlevnila quartzové hodinky tak, že se dnes už hodinky s jiným elektronickým mechanismem nevyrábějí. Lepší quartzové hodinky začaly být vyráběny se dvěma oscilátory, které umožňují teplotní kompenzaci, a odchylka chodu pak nepřesahovala 10 sekund za rok [5].

V roce 1990 byly představeny hodinky řízené rádiem a digitálním ukazatelem na LCD displeji. Základem pro seřízení rádiových hodinek je naprosto přesný čas atomových hodin. Tyto atomové hodiny přenášejí čas do hlavního vysílače. Ten v okruhu přibližně 2000 km vysílá dvakrát denně signál právě s časem atomových hodin, podle kterého se všechny přístroje připravené na příjem tohoto signálu seřídí [6].

Dalšími novinkami jsou elektronické hodinky s automatickou rádiovou synchronizací v kombinaci s GPS signálem, jejíž chyby chodu jsou v řádu nanosekund za den. Některé modely hodinek mají napájení pomocí solární energie, která dobíjí vestavěný akumulátor nebo varianta quartz hodinek s mechanickým dobíjením [7].

V roce 2014 byly na trhu představeny hodinky Apple Watch. Po jejich uvedení se několik značek rozhodlo vstoupit na trh moderních technologií a vznikly takzvané chytré hodinky.

Vývoj je v dnešní době zaměřen na použití nových materiálů při výrobě pouzder. Ať už je to titan, uhlíková vlákna nebo mořené exotické dřevo. Aby bylo možné tyto materiály zpracovat, zdokonalují se také výrobní metody.

### 1.1.2 Rozdělení hodinek

Dělení hodinek je možné provádět podle mnoha kritérií. Níže jsou uvedeny pouze subjektivně zvolené kategorie inspirované rozdělením několika výrobců a prodejců.

#### Podle strojku:

- *mechanické* – s pružinou, natahují se korunkou nebo samočinně excentrem,
- *quartz* – s analogovou indikací (ručičky), či s indikací číslicovou (digitální),
- *chytré hodinky* – funkce mobilního telefonu, kalkulačka, kalendář, GPS.

#### Podle způsobu nošení:

- *kapesní* – s mechanickým pohonem, původně se nosily v kapsičce pánské, vesty a byly připevněny řetízkem ke knoflíku,
- *náramkové* – s řemínkem vyrobeným z kovu, kůže, textilie nebo gumy, upevněným k hodinkám pomocí dvou stěžejek,
- *závěsné* – dámské hodinky nošené na řetízku kolem krku,
- *v prstenu* – hodinky s quartz mechanismem navléknuté na prst.

#### Podle zaměření:

- *módní* – odpovídající aktuálním módním trendům, bohatě zdobené a tvarované, bez vysokého požadavku na funkčnost,
- *luxusní* – od značkových výrobců, důraz na kvalitu zpracování, osazeny drahými kameny,
- *sportovní* – určeny k venkovním aktivitám, s měřením tepu, GPS, barometrem, kompasem,
- *pilotní* – s chronometrem a dodatečnými komplikacemi, otřesuvzdorné díky tlumenému uložení strojku v pouzdře,
- *potápěčské* – vodotěsné až do hloubky 1000 m, stopky odměřující zbývající čas pod vodou,
- *kontrastní* – hodinky s vylepšenou čitelností ciferníku a vysokým kontrastem
- *slepecké* – hodinky s hmatovým ciferníkem vybavené akustickým signalizátorem.

### 1.1.3 Hlavní části hodinek

Hodinky jsou zařízení ukrývající složitý mechanismus uvnitř malého prostoru. Vznikly za účelem přenositelnosti, bylo tedy nutné transformovat klasické velké hodiny do malého kompaktního zařízení. Jsou složeny z mnoha dílů s vysokým důrazem na přesnost. Také při jejich montáži je zapotřebí velké jistoty pohybu s použitím přiměřené síly. Na obr. 1.2 jsou hodinky včetně názvů jednotlivých dílů, které jsou detailněji popsány pod obr. 1.2.



Obr. 1.2 Hlavní části.

- *strojek* – viz níže,
- *pouzdro* – viz níže,
- *víčko* – viz níže,
- *ciferník* – tenký číselník s indexy měřené veličiny, často bohatě zdobený,
- *ručičky* – indikátory času v různých délkách, mohou být opatřeny luminiscenčním nátěrem,
- *sklíčko* – chrání indikační část hodinek, může být plastové, minerální nebo safírové,
- *řemínek* – slouží k připevnění těla hodinek k ruce, používané materiály: kov, kůže, guma a dřevo,
- *korunka* – používá se k nastavování času, u mechanických hodinek i k natahování pera,
- *korunkový hřídel* – přenáší otáčivý pohyb korunky do strojku,
- *stěžeжка* – tenký hřídel pro připojení řemínku k pouzdro,
- *přezka/spona* – slouží ke spojení konců řemínku a jeho délkovému nastavení.

## Strojky

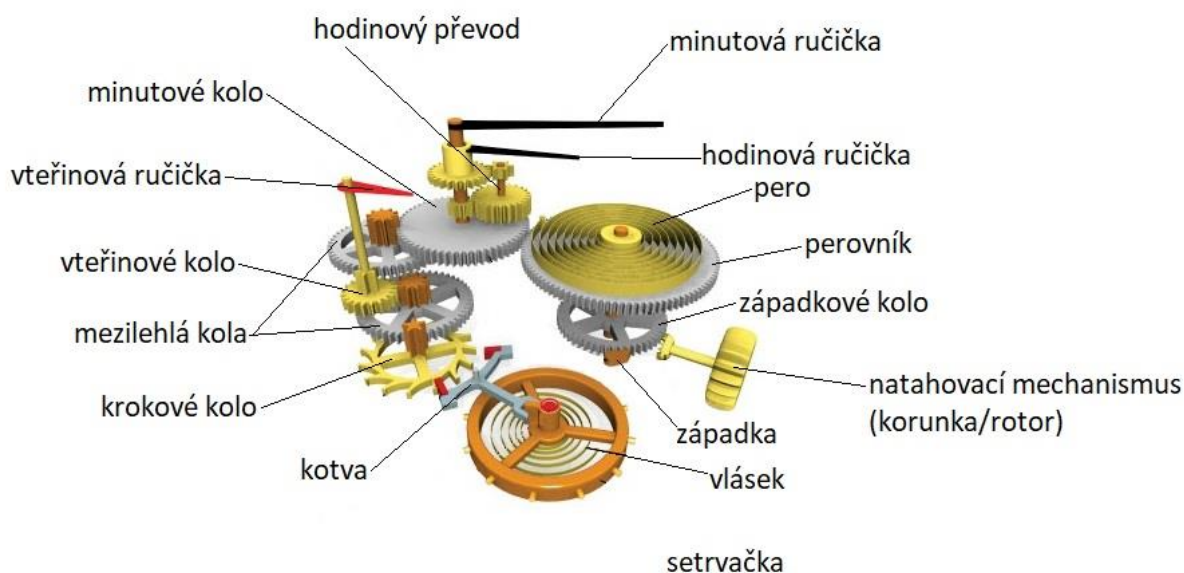
Aby hodinky sloužily ke svému účelu, je zapotřebí je osadit zařízením schopným pohánět indikaci času. Takovým „srdcem“ každých současných hodinek je strojek. V případě mechanického strojku je označení „srdce“ namístě, protože se jedná o funkční pohyblivý důmyslný mechanismus schopný oživit celé zařízení, včetně periodicky se opakujícího zvukového projevu, kterým je u hodinek tikot. Druhým typem je strojek quartz, jehož největší výhodou je vysoká přesnost a nízká cena.

## Mechanické

U mechanických strojků je zdrojem energie pero uložené v perovníku se západkovým mechanismem. Vnější závěs pera poté svým rozvinem roztáčí perovník, který pohání celý mechanismus zakončený setrvačkou. Setrvačka, uložená tak, aby odolávala otřesům a magnetickému poli, je usměrňována vláskem. Vlasek vrací setrvačku z výkyvů a udává jí frekvenci, reguluje tak celý chod strojku. Frekvence oscilátoru je jeden z aspektů, který určuje přesnost hodinek. Frekvence bývá v průměru 4 Hz, ale některé modely dosahují až hodnoty 15 Hz. Kmity setrvačky



zachycuje krokový mechanismus, který je tvořen kotvou a krokovým kolem. Při každém kmitu setrvačky propustí kotva jeden zub krokového kola a soustava ozubených převodů převádí tento pohyb na minutové kolo, na němž je připevněna minutová ručička. Od pohybu minutového kola se odvozuje pohyb hodinové ručičky. Na hřídeli druhého převodového kola může být upevněna vteřinová ručička, umístěná uprostřed nebo v krajní části ciferníku. Mechanické hodinky musí mít natahovací zařízení k natažení pera. Dříve se natahování provádělo ručně korunkou a od 20. let se používá automatické natahování excentrickým rotorem. Pohybem ruky se rotor roztáčí a převodovým soukolím natahuje pero. Aby nedošlo k přetažení, je vnější konec pera zavěšen na háčku kluzné uzdy, která při plném natažení pera v perovníku překoná tření mezi perovníkem a samotnou kluznou uzdou, proklouzne a tím uvolní maximální napětí pera. Rezervy chodu strojků jsou v průměru 48 hodin, ale existují i značky se strojky vlastní výroby disponující rezervou chodu až 168 hodin [8, 9]. Princip mechanického strojku s popisem jednotlivých částí je na obr. 1.3.

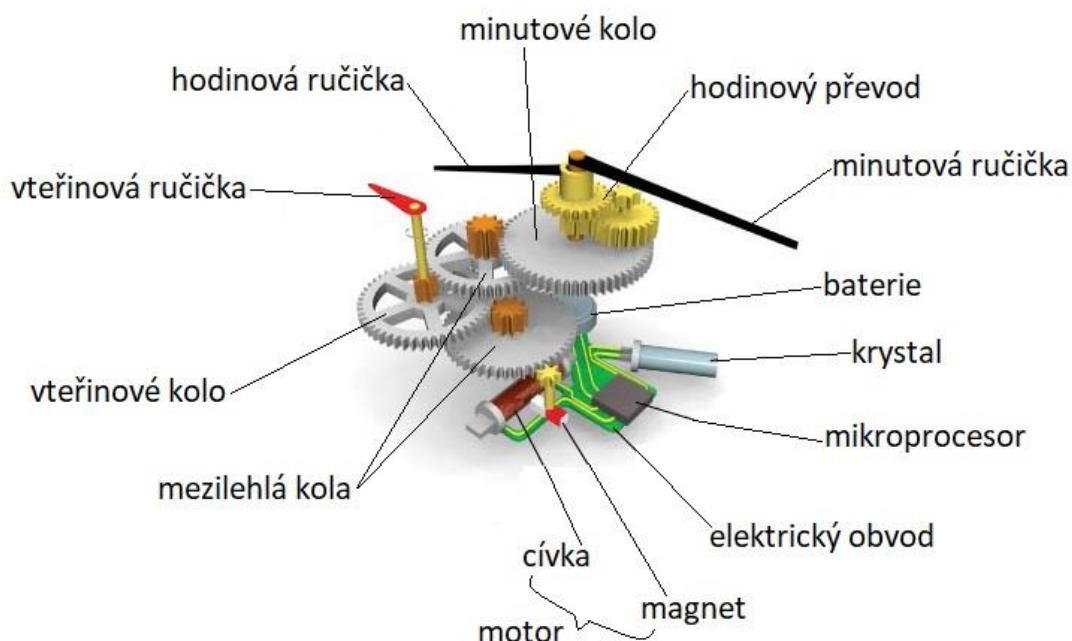


Obr. 1.3 Mechanický strojek podle [10].

## Quartz

U elektronických hodinek je zdrojem energie baterie. Proud z baterie je veden do elektronické desky s integrovaným obvodem. Z obvodu jsou vysílány impulzy do cívky, která je zesílí a pošle je dále do statoru. Ve statoru se nachází magnetický rotor, který se na základě těchto impulzů otáčí. Rotor se skládá z magnetické části a ozubené části. Ozubená část dále zabírá do soukolí ručičkových ozubených kol, která pomocí ručiček analogově indikují čas. Ale takto by strojek chodil nepřesně, proto je potřeba quartz (křemenný krystal) využívající piezoelektrického jevu – poznatek francouzských fyziků, kteří přišli na to, že když se na dvě proti sobě ležící plochy krystalu vloží kovové elektrody a zavede se do nich střídavé napětí, tak se krystal rozkmitá určitým kmitočtem. Pravidelností těchto kmitů je ve strojcích využíváno k usměrnění a ustálení frekvence oscilátoru nejčastěji na 32 kHz. Korunka slouží jen pro nastavení času. Quartz strojky jsou schopny

provádět také digitální indikaci na displeji z tekutých krystalů (LCD), které mají menší spotřebu energie, protože odpadá pohon mechanických částí. Naopak největší spotřebu mají quartzové hodinky v případě zapnutí ručičkového chronografu, kdy spolu s časem nám hodinky stopují. Baterie je schopna pohánět strojek 2-10 let, pak je nutná její výměna. Ovšem životnost strojku je pouze 25-30 let [8, 11]. Schéma quartz strojku s popisem jednotlivých částí je na obr. 1.4.



Obr. 1.4 Quartz strojek podle [12].

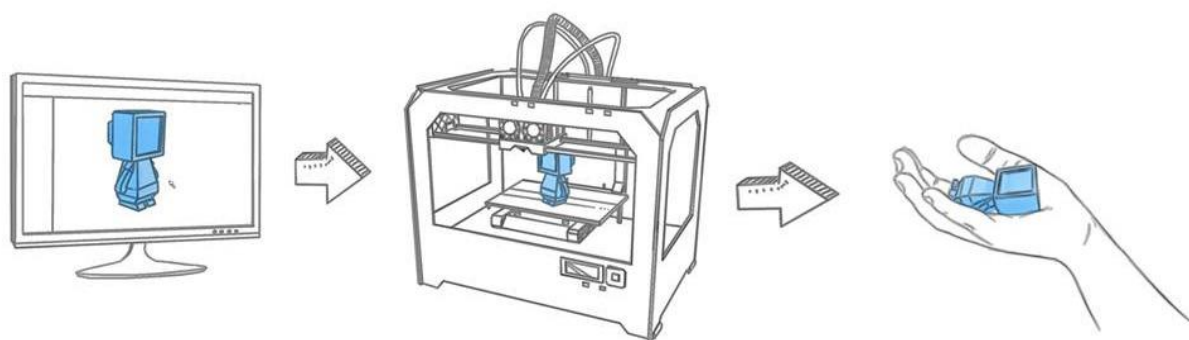
## Pouzdro a víčko

Pouzdro plní několik funkcí. Tou základní je chránit zranitelný strojek hodinek před nejrůznějšími vnějšími vlivy. Dalším úkolem pouzdra je umožnit majiteli nosit hodinky při sobě, to znamená možnost připevnění hodinek k ruce. A další je funkce estetická a reprezentativní. Odolnosti pouzdra proti vlivům vlhkosti, prachu i mechanickému namáhání je podřízen výběr materiálu. Náramkové hodinky bývaly opatřeny pouzdem ze snadno obrobitelné mosazi kryté tvrdším chromem. Nevýhodou takových pouzder bylo, že se svrchní vrstva vlivem nošení opotřebovala a nebylo možné ji opravit. Proto u pouzder dnešních hodinek převažují kvalitní materiály bez dalšího povrchového pokovování – nerezová ocel, titan, zlato, platina, ale i keramika. Výjimkou jsou velmi tvrdé a odolné vrstvy moderních povrchů typu PVD, které do hodinařiny přináší možnost mít hodinkové pouzdro například v černé barvě [13].

Víčko je část pouzdra kryjící strojek ze spodní části. Mnoho let se vyrábělo z pochromované mosazi, ze zlata a nerezové oceli. Dnešní výrobci mechanických hodinek často používají prosklené víčko, aby bylo možné nahlédnout do celého mechanismu a obdivovat technickou dokonalost. Víčka nesou mnoho nápisů jako značku, modelovou řadu, materiál, ryzost drahého kovu, stupeň vodotěsnosti, výrobní číslo atd. Víčko musí být oddělitelné, aby byl zpřístupněn strojek a bylo možné provádět demontáž a opravy. Způsobů upevnění je několik, například namačkávání, šroubování celého víčka nebo připevnění pomocí šroubků.

## 1.2 Aditivní technologie Rapid Prototyping

Skupina výrobních technologií spadající do kategorie Rapid Prototyping (RP) se používá především k výrobě prototypů před uvedením dílu do sériové výroby. Jedná se o aditivní technologii, což znamená, že se při výrobě materiál neubírá, jako je tomu u třískového obrábění, ale naopak se přidává. Tyto prototypy slouží mimo jiné k vizualizaci vzhledu, např. při prezentaci pro zákazníka. Cílem je co nejrychlejší převedení modelu vytvořeného v některém modelovacím CAD programu ve skutečně hmatatelný produkt (obr. 1.5). Podstatou Rapid Prototyping je rozřezání virtuálního 3D modelu na tenké vrstvy, které jsou přetvořeny, v závislosti na použité metodě, ve skutečný model. Nanášené vrstvy mají konstantní tloušťku. Nevzniká zde žádný odpadní materiál jako je tomu u frézování a soustružení, kde jsou odpadním materiálem obrobené třísky. Velikou a nespornou výhodou RP je výroba tvarově složitých dílů i s vnitřními dutinami. RP umožňuje ověřit funkci, design i ergonomii dílu.



Obr. 1.5 Princip RP [14].

Nástup softwaru pro 3D modelování na trh znamenal pro strojírenský průmysl velký posun. Oproti klasickým technickým 2D výkresům, bylo najednou možné vytvořit trojrozměrný model, který byl lépe představitelný. Díky tomu bylo možné provádět celý vývojový proces nejenom jednoho dílu, ale i celého mechanicky složitěho výrobku přímo na počítačovém modelu. Nyní takové softwary nabízejí velkou škálu nástrojů pro úpravu modelu. Velikou výhodou je vizualizace, která umožní konstruktérovi vytvoření dílu přesně podle přání zákazníka. A to nejen při osobních setkání, ale také na dlouhé vzdálenosti. Konstruktor může poslat zákazníkovi náhled vizualizace, popřípadě renderovaného modelu prostřednictvím e-mailu. Nicméně před uvedením dílu do sériové výroby je nezbytné vytvořit prototyp, na kterém proběhne ověření správnosti funkce a testování smontovatelnosti. Ale výroba prototypu běžnými výrobními technologiemi je několikanásobně časově i finančně náročnější. Je potřeba vymyslet technologický postup, způsoby upínání obrobku, volbu řezného nástroje a použití procesní kapaliny. Ovšem při výrobě prototypu 3D tiskem se tyto činnosti provádět nemusí [15].

Prototypová součást může být podle typu použité technologie vytvořena z pryskyřice, termoplastu nebo kovového prášku. Volba materiálu závisí na účelu použití a na požadovaných vlastnostech konečného dílu. V současné době se pomocí 3D tiskáren vytváří nejen prototypy, ale také slouží k výrobě náradí, forem a součástí pro malosériovou výrobu. Využívá se v oblastech leteckého a automobilového průmyslu, spotřební elektroniky, lékařství, ale také například v marketingu. Ve všech zmíněných oblastech došlo ke zkrácení času vývoje nových součástí a snížení nákladů [15].

### 1.2.1 Etapy výroby

Technologie RP má tři etapy, kterými jsou preprocessing, processing a postprocessing. Jde tedy o přípravu 3D dat, poté následuje vlastní stavba modelu a poslední část tvoří různé dokončovací operace.

Je několik možností získání dat pro technologie RP. Jednou z nich je proces Reverse Engineering (RE), kdy na začátku výrobního procesu je fyzický model, který se převádí do digitální podoby. Převod reálné součásti do digitální podoby se nazývá 3D digitalizace nebo také skenování (Obr. 1.5), které se provádí 3D skenerem. Výstupem je mračno bodů, které se převede na trojúhelníkovou síť, která může být uložena jako model do vhodného formátu. Další možností je virtuální model, který se vymodeluje v nějakém CAD softwaru na počítači a posléze se převede do formátu .stl, což je soubor, který popisuje pouze geometrii povrchu bez barev a textur a je mnohem kompaktnější. Tento soubor je také tvořen velkým počtem rovinných trojúhelníkových plošek. Pro systémy RP je nezbytné, aby tato síť rovinných plošek dokonale uzavírala objem součásti. Je tedy velmi důležité zkontrolovat vytvořený soubor. Dalším krokem preprocessingu je vytvoření tenkých řezů, které jsou základem pro následné vytvoření součásti metodami RP. Data modelu a případné podpory jsou podrobeny horizontálním rovinným řezům, které definují 2D obrysovou geometrii a jsou základním vstupem pro systémy RP. Na vhodnou tvorbu řezu má vliv i orientace součásti. Vhodnou orientací součásti je možno minimalizovat objem nezbytný pro tvorbu podpůrné konstrukce, což má samozřejmě vliv na celkový čas tisku modelu [16].

Processing je etapa, ve které dochází k samotné výrobě součásti. Stavba modelu je prováděna nanášením materiálu po jednotlivých vrstvách. Výroba součásti je u většiny zařízení RP plně automatizovaná, a proto není potřeba přítomnosti operátora. Doba potřebná ke zhotovení modelu se pohybuje v řádu několika hodin, záleží samozřejmě na druhu technologie, na použitém zařízení, ale hlavně na velikosti a tvarové složitosti vyráběné součásti [16].

Postprocessing představuje poslední fázi výroby. Začíná vyjmutím součásti z pracovního prostoru zařízení. Pokud je součást obklopena tiskovým materiálem, je nutné ho odstranit. V závislosti na druhu metody se materiál nejčastěji odsává (práškový materiál) nebo se odstraní oplachem (např. fotopolymer). U některých metod je zhotovený díl křehký a vyžaduje další zpracování jako vytvrzení dílu UV zářením nebo napuštění dílu látkou, která zvýší jeho pevnost. Pokud byly použity podpory, je následujícím úkolem jejich odstranění. Posledním krokem jsou dokončovací operace, které dodají součásti finální podobu. Dojde k obrobení a broušení funkčních ploch, barvení, lakování nebo i galvanickému pokovení [16].

### 1.2.2 Přehled metod

Metody technologie RP se v zásadě liší výchozím stavebním materiálem. Ten je buď v tekutém stavu, pevném stavu, nebo ve formě prášku. Od formy materiálu se odvíjejí výsledné vlastnosti a použití finálního výrobku. V současnosti je škála metod již relativně rozsáhlá a níže popsané metody jsou pouze ty nejvýznamnější.

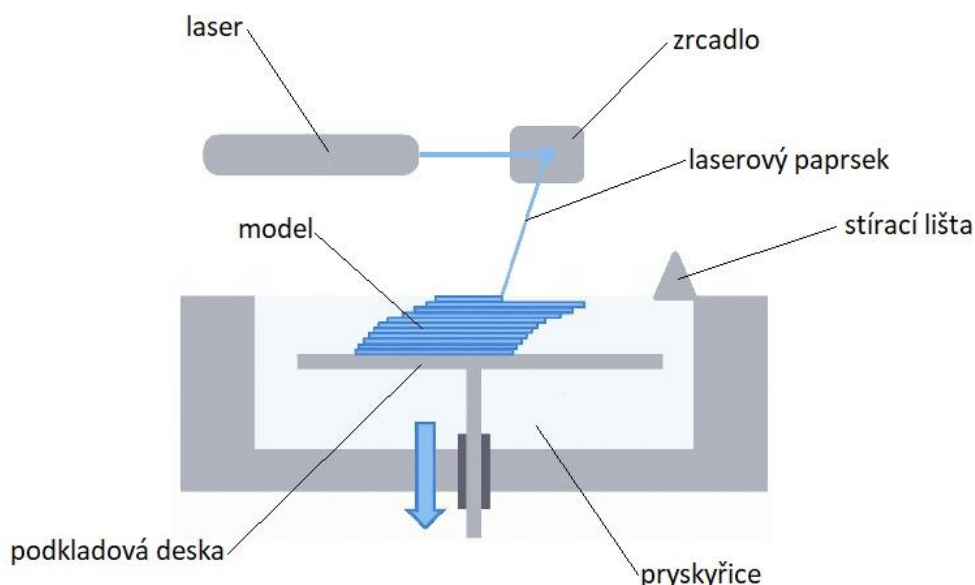
#### Stereolitografie

Metoda Stereolitografie (SLA) je založena na postupném vytvrzování jednotlivých vrstev z fotopolymerní pryskyřice laserem. Největší výhodou je možnost výroby modelů s jemnými detaily, protože je jednou z nejpřesnějších metod. Metoda SLA je používána především v automobilovém průmyslu, ale také při výrobě forem pro lití



a vstřikování. Vzhledem k dosahované přesnosti se dá použít i na výrobu integrovaných obvodů [15].

Stereolitografická tiskárna (obr. 1.6) se skládá z pracovní komory, řídicí jednotky a opticko-laserového systému. V pracovní komoře je umístěna nádoba s epoxidovou pryskyřicí, ve které se pohybuje stírací lišta zajišťující rovinu pryskyřice v každé vrstvě. Řídicí jednotka má na starosti ovládání celého zařízení od nastavení parametrů laseru až po ovládání pohonů. Poslední část, opticko-laserový systém, se skládá z laseru, čoček a soustavy zrcadel pro nasměrování laserového paprsku.



Obr. 1.6 SLA podle [17].

Před samotnou stavbou modelu se nejprve určí nejvhodnější poloha modelu tak, aby se minimalizovaly dokončovací práce a vygenerují se podpory. Stavba SLA modelu probíhá postupným vykreslováním 2D obrysů do pryskyřice laserovým paprskem. V místě dopadu paprsku je pryskyřice vytvrzena a platforma se posune o tloušťku vrstvy směrem nahoru/dolů, což závisí na typu tiskárny. Poté se celý proces opakuje tolikrát, dokud není vykreslena poslední vrstva. Uchycení modelu k platformě je dosaženo podporami, které model fixují v dané poloze a zabraňují jeho zborcení. Podpory musí být řešeny tak, aby se daly snadno z modelu odstranit a zároveň neovlivnily výslednou kvalitu povrchu. Po skončení stavby se model vyjme a omyje od nevytvrzené pryskyřice. Na finální vytvrzení slouží UV komora, kde model získá požadovanou pevnost [18].

### Selective Laser Sintering

Metoda Selective Laser Sintering (SLS) je založena na postupném spékání materiálu ve formě jemného prášku pomocí CO<sub>2</sub> laseru. Okolní nespečený prášek slouží jako podpora, proto je možné zhotovit i velké komplexní funkční díly. Jako materiál se při této metodě může použít termoplast, pryž, kov, keramika i speciální písek [15].

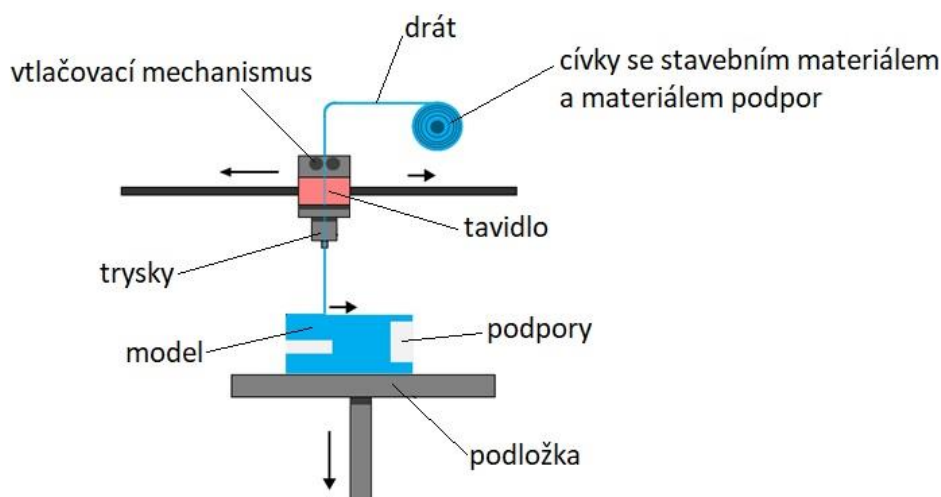
Metoda využívá vertikálně posuvnou podkladovou desku, na kterou je nanесena vrstva jemného prášku pomocí speciálního válečkového mechanismu. Tato vrstva je selektivně zahřívána CO<sub>2</sub> laserem na určitou teplotu a dochází k jejímu spékání. Řídicí systém upravuje intenzitu laserového paprsku tak, aby byl materiál spečen jen v požadovaném místě. Okolní nenatavený materiál zůstává nedotčen a slouží jako

podpora, která je po dokončení stavby modelu odstraněna. Po dokončení jedné vrstvy se podkladová deska posune o tloušťku vrstvy dolů a proces spékání se opakuje. Pracovní prostor je vyplněn inertním plynem, obvykle dusíkem, který brání oxidaci materiálu. Na hotovou součást je nanесeno navíc několik centimetrů prášku, aby bylo zajištěno rovnoměrné chladnutí, proto jsou nezbytnou součástí výrobního procesu dokončovací operace. Povrch je nutné tryskat, brousit, leštit nebo obrábět stejným způsobem jako klasický kovový materiál [18].

Výhoda SLS modelů oproti SLA spočívá v jejich vyšší pevnosti. Modely tak nacházejí uplatnění ve vývojových odděleních při zatěžovacích a napěťových zkouškách. Kvůli použití prášku a větší tloušťce vrstev však nelze u SLS modelů dosáhnout takových detailů jako u metody stereolitografie. Nicméně vzhledem k nižšímu počtu vrstev lze snížit výrobní čas [18].

### Fused Deposition Modeling

Metoda Fused Deposition Modeling (FDM) (obr. 1.7) spočívá v natavování termoplastického drátu navinutého na cívce, ze které je vtlačován do vyhřívané trysky. Jako termoplastický materiál pro výrobu modelů se nejčastěji používá ABS plast, polykarbonát, elastomer nebo vosk, který se do zařízení vkládá ve speciálních kazetách. Tato metoda tisku vyžaduje stavbu podpor, proto je dávkovací hlava vybavena dvěma tryskami. Jedna tryska nanáší modelovací materiál a druhá nanáší materiál podpurný [15].



Obr. 1.7 FDM podle [19].

Drát materiálu je kontinuálně vtlačován do nanášecí hlavy, kde je ohřán do polotekutého stavu. Po ohřátí je protlačen přes tenkou trysku nanášecí hlavy, která ho na základě instrukcí řídicí jednotky nanese na obrys dílu. Materiál ihned při nanesení tuhne a připojí se k již vytvořeným vrstvám. Jakmile je vrstva dokončena, stůl sjede ve směru osy Z o jednu tloušťku vrstvy dolů a proces se opakuje.

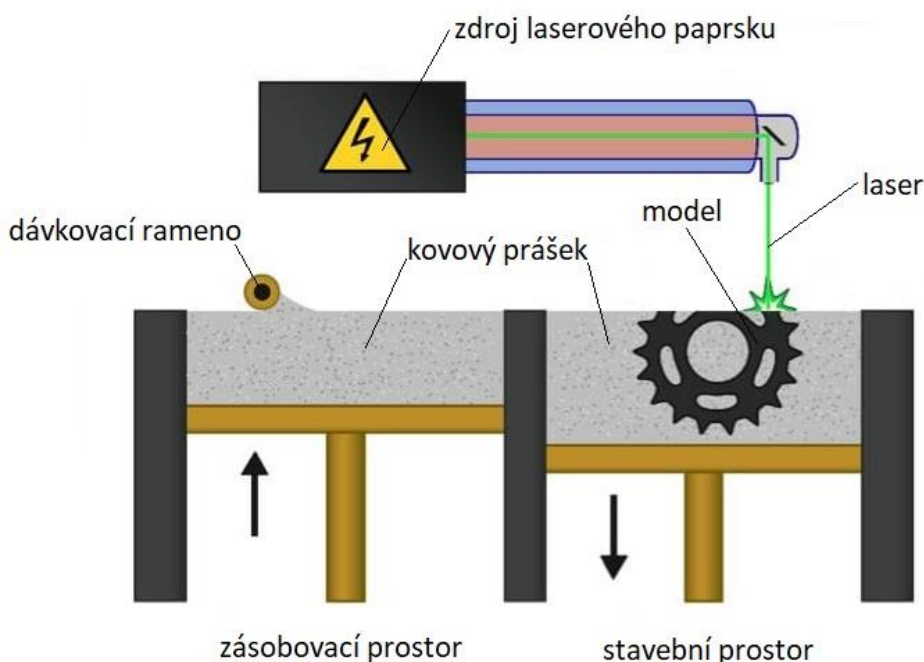
Po ukončení procesu je nutné odstranit podpory, a to buď mechanicky nebo vyplavováním. U metody vyplavování je podpora vytvořena z rozpustného materiálu, který se působením vodního roztoku rozpustí. Jedná se o velmi efektivní způsob, protože umožňuje odstranění podpor i z těžko přístupných míst a urychluje tak postprocessingovou část RP.

Výhodou této technologie jsou poměrně slušné mechanické vlastnosti a vysoká teplotní odolnost, na druhé straně tato technologie je náročnější po stránce povrchové

úpravy modelu, má menší přesnost a vlastní stavba potřebuje delší čas. FDM technologie nachází velké uplatnění u mechanicky namáhaných dílů s kombinací teplotního zatížení. Její doménou je výroba jednoho zátěžového vzorku pro zkoušky a ověření funkčnosti. Na druhou stranu při požadavku více kusů je nevýhodná a finančně náročná. Vzhledem k tomu, že ABS materiál může být dodán v různém barevném provedení, nabízí se jeho využití také pro vizuální prezentace. FDM modely z ABS materiálu je možno přímo použít pro technologie vytavitelného lití [20].

### Selective Laser Melting

Metoda Selective Laser Melting (SLM) (Obr. 1.8) je v principu velmi podobná metodě SLS. Rozdíl je v tom, že nedochází ke spékání, ale k úplnému roztavení kovového materiálu. Výrobek tedy není tvořen jednotlivými částicemi spečenými dohromady, ale díky tavení vzniká homogenní kus materiálu s lepšími fyzikálními vlastnostmi [21].



Obr. 1.8 SLM podle [22].

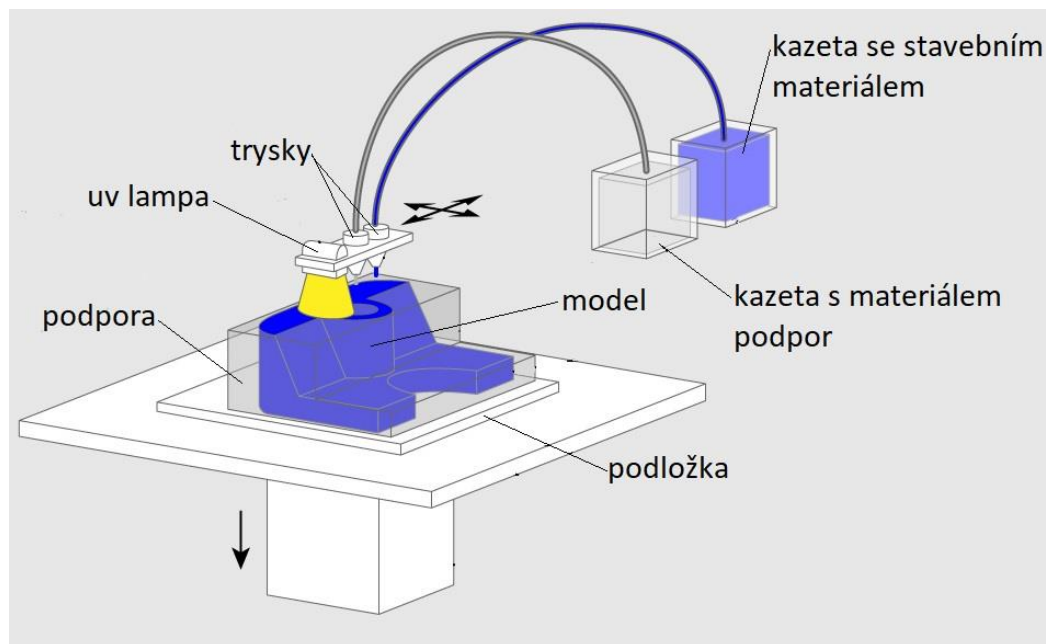
Dávkové zařízení nastaví množství prášku pro jednu vrstvu a rameno s keramickým břitem jej rovnoměrně rozprostře na povrch platformy ve zvolené tloušťce. Řídicí program stroje, ovládající také proměnné zaostření paprsku laseru, určí trajektorii paprsku v souřadnicích X a Y. Pohyb v ose Z zajišťuje posuv platformy. V místě dopadu laserového paprsku je velmi jemný kovový prášek lokálně roztaven v celé tloušťce jedné vrstvy a následným tuhnutím se spojí s podkladovou vrstvou. Okolní nenatavený materiál, který funguje také jako podpora, odvádí teplo vznikající při tavení, takže roztavený kov tuhne velmi rychle. Pracovní komora musí být vyplněna inertním plynem jako je argon nebo dusík, který chrání tisknutý díl před oxidací. SLM nabízí možnost výroby řízené porozity pro odvodu vzduchu či filtraci. Po vyrobení součásti se provádí dokončovací operace, kterými se musí odstranit podpory. Dále se výrobek může obrábět, pískovat, brousit, leštit nebo tryskat.

Tato metoda umožňuje tisk z více kovových materiálů, například z nerezové oceli, titanu, hliníku, niklu a chrom-kobaltové slitiny. Vyrobene součásti se z pohledu mechanických vlastností podobají dílům, které byly odlity či vykovány. Nedochází zde

k narušení vláken kovu jako u klasického obrábění. Vyrobený díl může sloužit jako prototyp, ale i jako finální výrobek. Prášek, který nebyl spotřebován, se vrací zpět do výroby. SLM je tedy jak ekonomická, tak ekologická technologie [21].

### PolyJet

Technologie PolyJet (obr. 1.9), patentovaná izraelskou firmou Objet (nyní součást společnosti Stratasys), funguje na bázi tryskání fotopolymerních materiálů v ultratenkých vrstvách. Umožňuje tisk z pevných, pružných a průhledných materiálů v mnoha barevných odstínech [23].



Obr. 1.9 PolyJet podle [24].

Tisková hlavice je vybavena zdrojem UV záření a několika tryskami. Na výrobní podložku jsou přes trysky vstřikovány malé kapičky fotopolymeru, které jsou okamžitě po nástřiku vytvrzeny UV světlem. Díky více tryskám lze tisknout několik materiálů najednou, v tom je technologie unikátní. Se stavebním materiálem je zároveň nanášen i podpurný materiál. Výsledkem jsou plně vytvrzené modely, které lze používat okamžitě bez dodatečného tvrzení. Gelový podpurný materiál, učený k podepření komplikovaných geometrií a ke snadnějšímu oddělení od podložky, je následně odstraněn proudem vody.

Tloušťka vrstvy až 14  $\mu\text{m}$  umožňuje dosažení ještě větších detailů než SLA technologií. Navíc díky své schopnosti kombinovat materiály předčí konečný výrobek každou jinou tiskovou technologií [23].

## 2 PRAKTICKÁ ČÁST

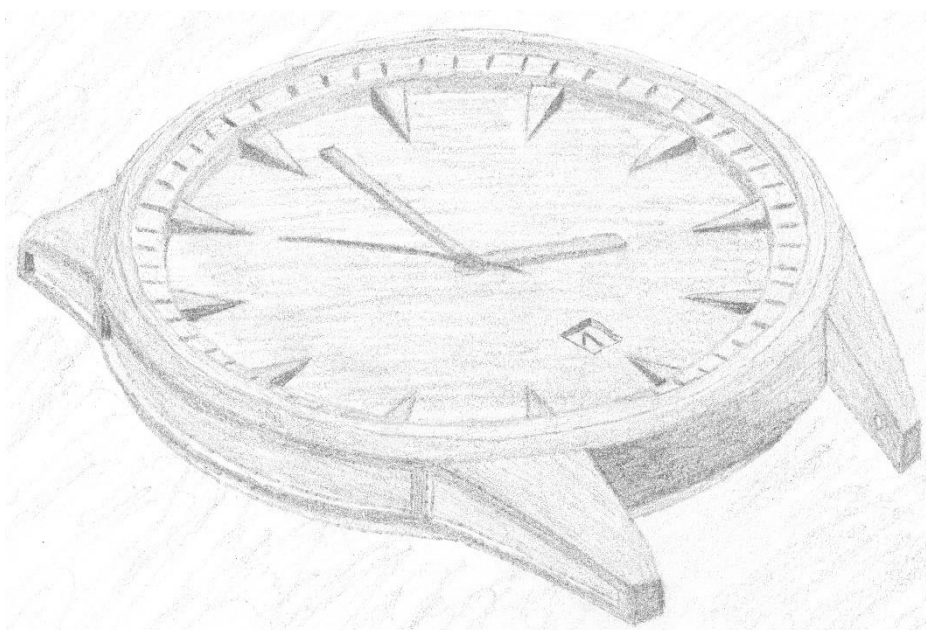
Hlavním podnětem pro výrobu hodinek pomocí 3D tisku bylo velké množství odpadního materiálu u výroby klasickými konvenčními metodami a s tím spojené navazující operace, jako sběr a transport třísek. Tato kapitola je zaměřena na poznání celého procesu od návrhu po výrobu touto technologií.

### 2.1 Tvorba modelu

Vytváření modelu zahrnuje kromě samotného modelování také návrh vzhledu a přidání konkrétních rozměrů.

#### 2.1.1 Design hodinek

Práce začala několika základními náčrty. Bylo nutné vybrat správný a líbivý tvar pouzdra, který tvoří většinu viditelné části hodinek. Současné technologie umožňují výrobu v podstatě libovolného tvaru od klasického kruhového přes stále populárnější obdélníkový, až po různé trojúhelníkové či zcela nepravidelné útvary. A to hlavně díky pětiosým obráběcím centrům a právě 3D tiskárnám. Proto bylo možné pustit uzdu fantazii a vymyslet cokoliv. Tvar byl ovšem zvolen kruhový kvůli praktičnosti, komfortu a celkové uhlazenosti tvarů. Cílem bylo vytvořit tenké, lehké a reprezentativní hodinky, které budou spojovat moderní technologie výroby s tradičním produktem a hodnotami. Výsledná skica je na obr. 2.1.



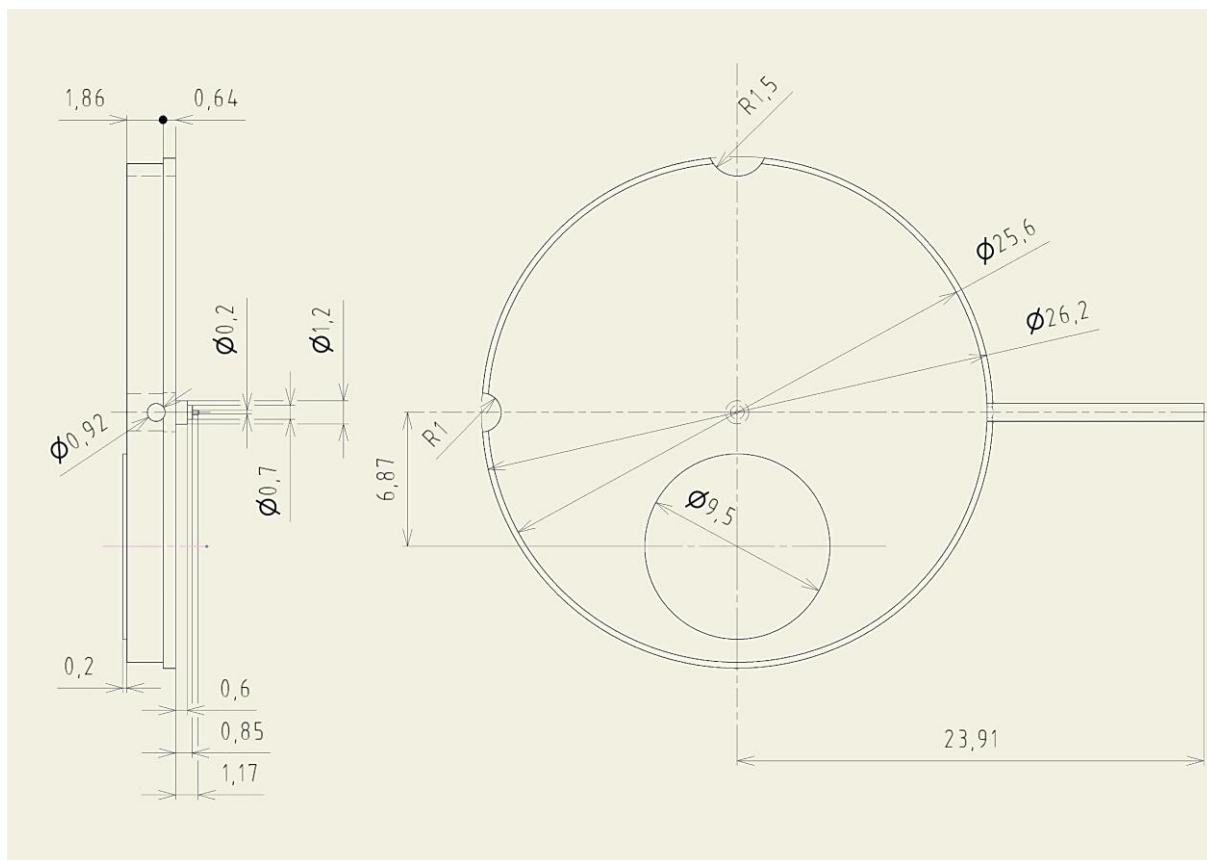
Obr. 2.1 Skica.

#### 2.1.2 Dimenzování hodinek

Pro splnění cíle, vytvořit tenké hodinky, bylo nutné vybrat tenký strojek. K tomuto záměru se hodí quartzové strojky, které oproti mechanickým mohou dosahovat mnohem kompaktnějších rozměrů. Po zvažování několika strojků od různých výrobců byl vybrán strojek Normtech 715 od firmy Ronda, který kromě splnění rozměrových požadavků (obr. 2.2) zaujal hlavně jednoduchostí tvaru. Tvar umožňoval snadné zakomponování do pouzdra. Tento strojek je vyráběn ve dvou variantách, a to SWISS MADE (SM) a SWISS PARTS (SP). Provedení SM má uložená kola na pěti



rubínových kamenech a je vyroben a smontován ve Švýcarsku. V provedení SP je uložení nahrazeno šatony (=skleněná imitace drahokamu), součástky jsou vyrobeny ve Švýcarsku, ale strojek je smontován v Hong Kongu. Strojek má výstup na hodinovou, minutovou, vteřinovou ručičku a datumovku na pozici šesté hodiny.



Obr. 2.2 Náčrt strojku.

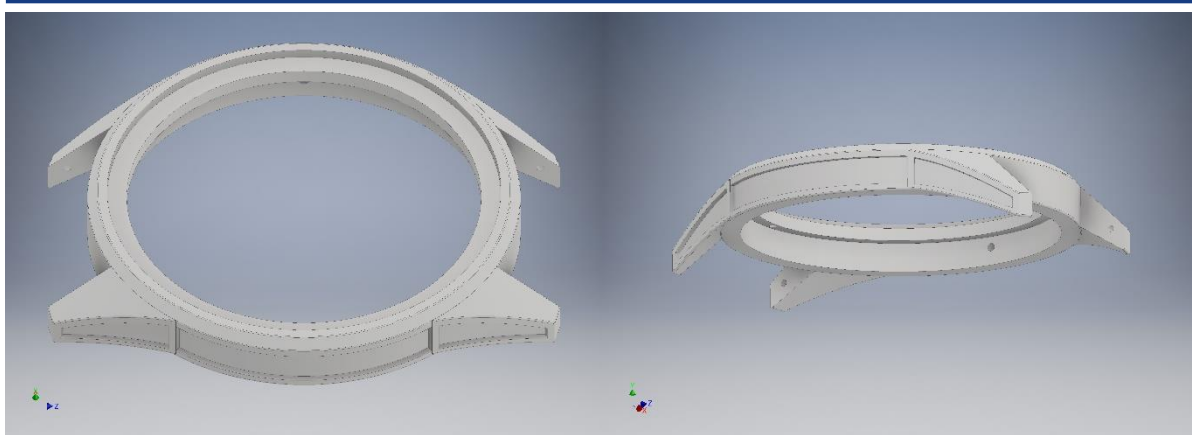
Po výběru strojku bylo možné grafickému návrhu přiřazovat konkrétní rozměry. Obvodový průměr pouzdra byl zvolen 44 mm, tloušťka 7 mm, rozteč pro uchycení pásky 20 mm. Další rozměry byly zvoleny tak, aby vzhled odpovídal grafickému návrhu a ergonomii. Vnitřní rozměry byly přizpůsobeny strojku a sklíčku. Sklíčka se vyrábí v několika tloušťkách a průměrech. Pro tento model bylo zvoleno minerální sklíčko s tloušťkou 1 mm a průměrem 40 mm.

### 2.1.3 Modelování

Veškeré modely byly vytvořeny ve studentské verzi programu Inventor Professional od softwarové společnosti Autodesk. Zkonstruovány byly modely jednotlivých komponent vypsanych níže. Na závěr byla z komponent vytvořena sestava a její rozpad.

## Pouzdro hodinek

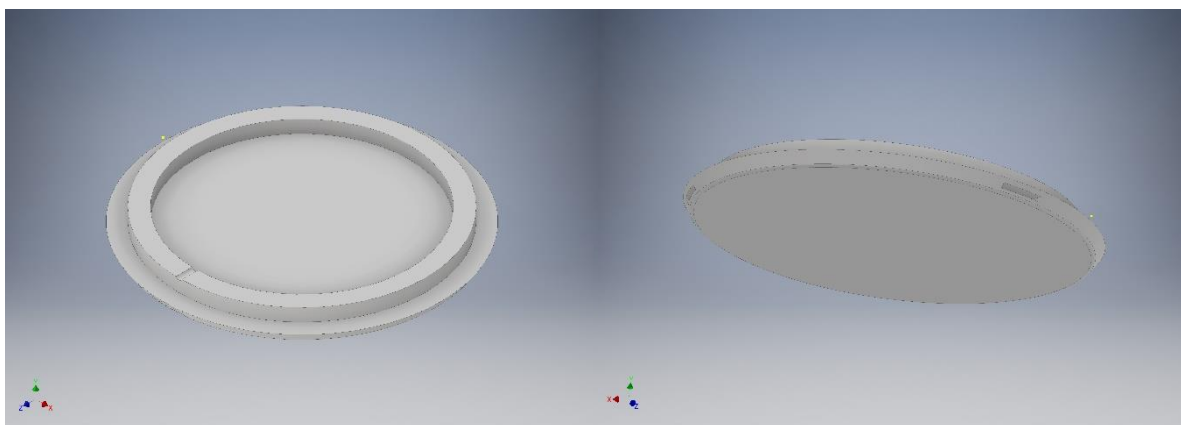
K vytvoření základního tvaru pouzdra byl proveden průnik horního a bočního náčrtu. Zaoblené horní a spodní části nožiček bylo dosaženo rotací dvou kulových úsečí. Poté byl upraven vnitřní profil pouzdra pro usazení dalších komponent. Následovalo estetické vybrání na vnějších plochách a vytvoření otvorů pro korunkový hřídel, vystředění ciferníku a usazení stěžejek. Nakonec byly některé hrany zkoseny a ostatní zaobleny. Model pouzdra je na obr. 2.3.



Obr. 2.3 Pouzdro.

### Víčko hodinek

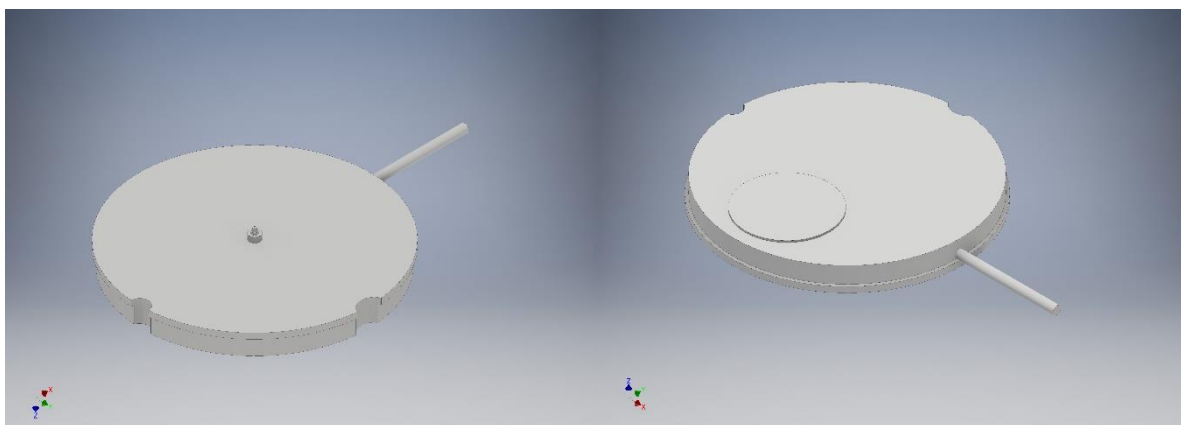
Modelování víčka obnášelo vytvoření náčrtu profilu, který byl rotován o  $360^\circ$ . Dále byli vysunutím přidány tři otvory sloužící k vytahování víčka z pouzdra. Model víčka je na obr. 2.4.



Obr. 2.4 Víčko.

### Quartz strojek

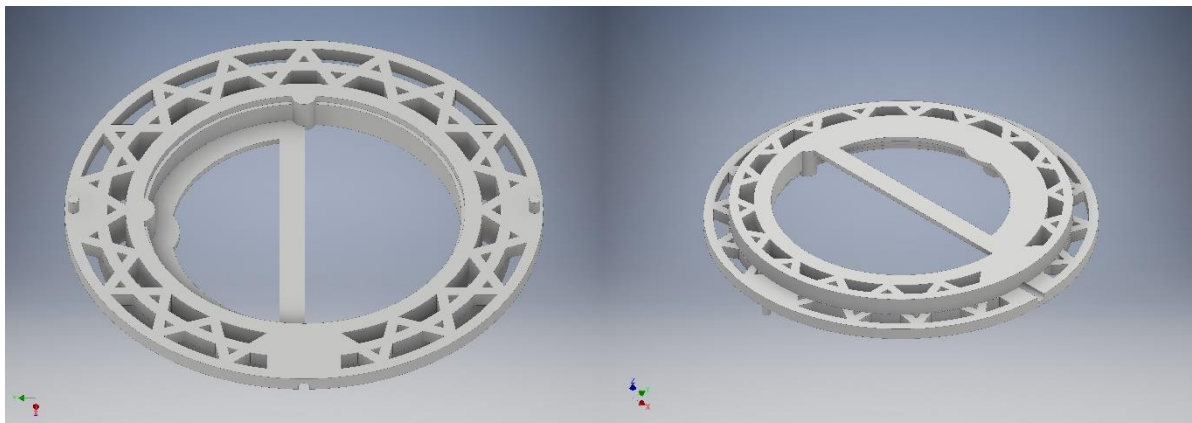
Podle technické specifikace a reálného měření strojku byl vymodelován jeho zjednodušený model. K tvorbě tohoto modelu bylo využito pouze vysunování jednotlivých náčrtů ve vodorovných rovinách. Model strojku je na obr. 2.5.



Obr. 2.5 Strojek.

## Klec strojku

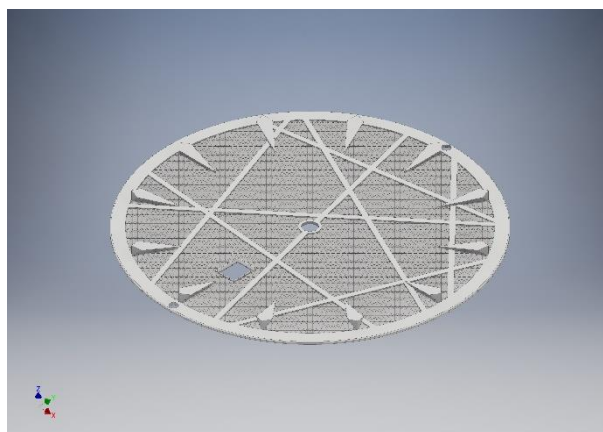
Modelování klece, sloužící ke správnému usazení strojku do pouzdra, bylo provedeno ve třech fázích. První fází bylo vytvoření plného modelu včetně středících výstupků, ze kterého byl ve druhé fázi odebrán tvar dříve vymodelovaného strojku. V konečné fázi byly vytvořeny trojúhelníkové odlehčovací otvory při jejichž náčrtu bylo využito funkce kruhové pole. Vnější průměr klece byl cíleně zvolen o 0,1 mm menší než průměr pro usazení v pouzdře, aby byla usnadněna následná montáž a středění. Model klece je na obr. 2.6.



Obr. 2.6 Klec.

## Číselný ciferník

Soubor modelu ciferníku byl svým datovým objemem největší. To bylo způsobeno mnoha detaily, především vroubkováním o velikosti 0,4 mm. Prvním krokem bylo vytvoření nízkého válce, do kterého byly vysunutím a obdélníkovým polem vytvořeny zářezy tvaru „V“. Následně byly tyto zářezy vytvořeny i v kolmém směru, a tak bylo dosaženo vroubkovaného vzhledu. Vzhled byl doplněn o několik hladkých pruhů a rámeček datumovky. Na tento podklad bylo kruhovým polem přidáno dvanáct hodinových značek ve tvaru zkoseného čtyřbokého hranolu. Nakonec byly přidány dva středící otvory. Model ciferníku je na obr. 2.7.

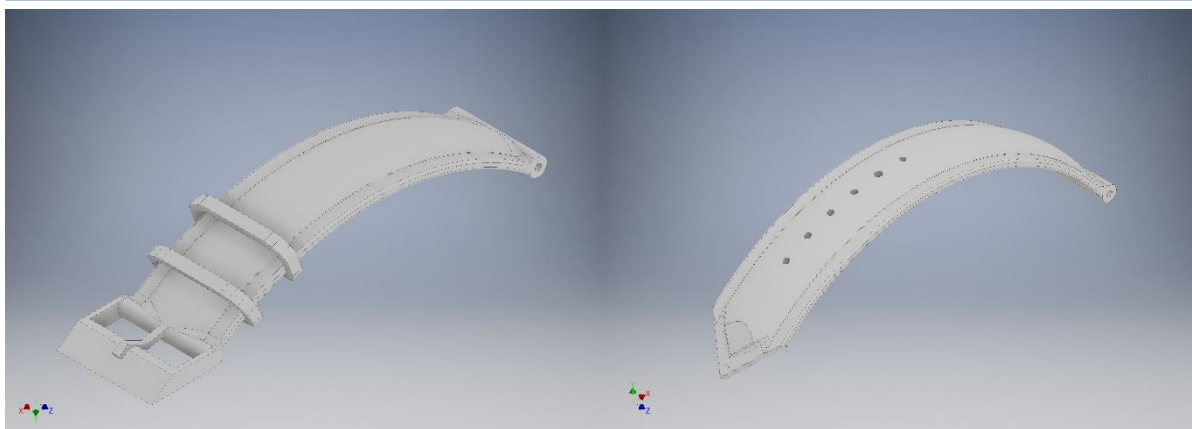


Obr. 2.7 Ciferník.

## Řemínek k hodinkám

Vymodelovaný řemínek se skládá ze dvou částí o rozdílných délkách. Obě části byly vytvořeny tažením profilu po křivce. Jedna z nich byla zakončena přezkou a do druhé, zakončené do špičky, bylo uděláno několik otvorů. Oběma částem bylo na druhém konci vytvořeno zakončení s otvorem na stěžečku. Modely obou částí řemínku jsou na obr. 2.8.





Obr. 2.8 Řemínek.

### Krycí sklíčko

Vysunutím náčrtu kružnice vznikl model sklíčka. Poté byl pouze změněn vzhled modelu úpravou na čirý skleněný materiál.

### Korunkový hřídel s korunkou

Závitový hřídel s průměrem 0,9 mm byl nahrazen hladkým o stejném průměru, který je pro potřebu vizualizace dostačující. Korunce bylo po obvodu přidáno vroubkování vysunutím a zkosena vnější hrana.

### Stěžeжка

Zjednodušená stěžeжка byla vymodelována z reálně změřených funkčních rozměrů.

### Indikační ručičky

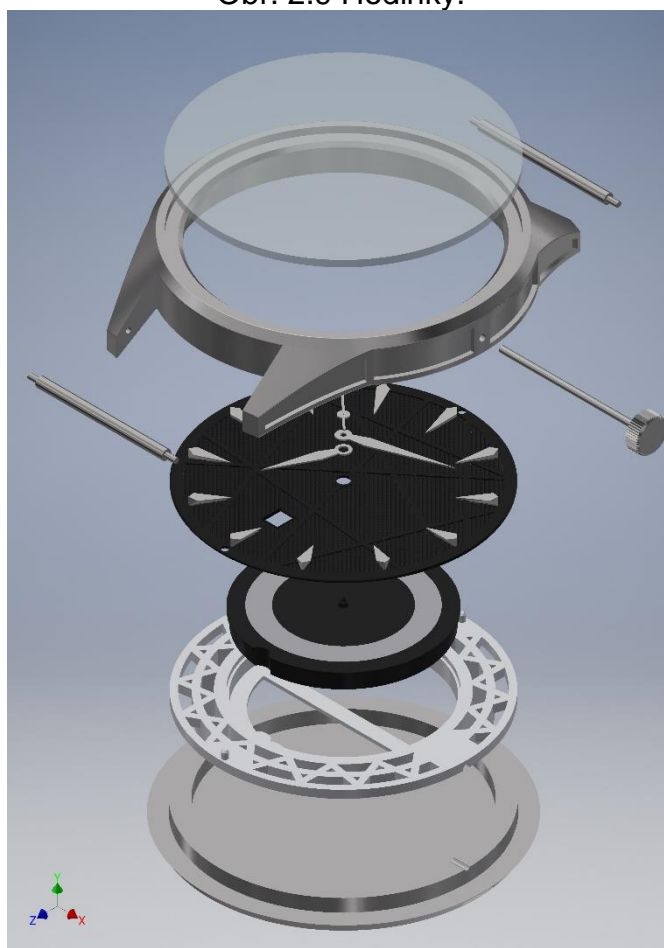
Vybraný strojek dokáže pohánět minutovou, hodinovou i vteřinovou ručičku. Každá z ručiček byla vytvořena jako samostatný model, a to vysunutím náčrtu obrysu a příslušného rozměru otvoru.

### Sestava hodinek

Všem modelům po jejich vytvoření byla přidána barva, pomocí funkce vazba byla z modelů vytvořena sestava (obr. 2.9) a použitím další funkce byl vytvořen rozpad těla hodinek (obr. 2.10).



Obr. 2.9 Hodinky.



Obr. 2.10 Rozpad.

## 2.2 Výroba dílů

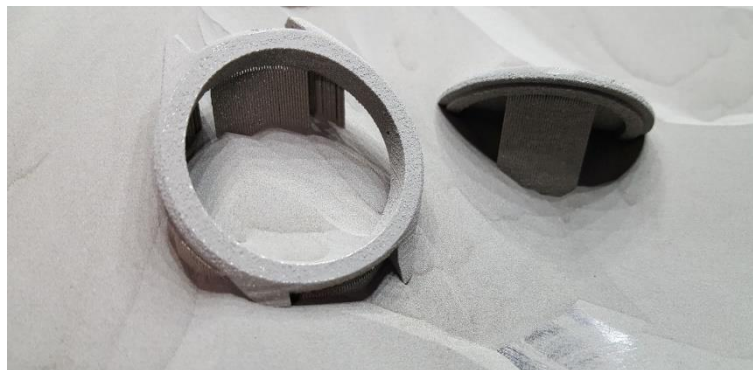
Pro výrobu bylo využito dvou technologií RP. Modely pouzdra a víčka byly vyrobeny pomocí SLM technologie z kovového prášku, modely ciferníku a klece zase pomocí PolyJet technologie z fotopolymeru.

### 2.2.1 Tisk na SLM zařízení

Tisk pouzdra a víčka byl proveden na zařízení Renishaw AM 400, které je vybaveno laserem o průměru 70  $\mu\text{m}$  s výkonem 400 W, pracovní prostor má rozměry 250 x 250 x 300 mm. Toto zařízení umožňuje výrobu z nerezové oceli (316L), nástrojové oceli (H13), hliníkové slitiny (AlSi10Mg), slitiny kobalt-chromu (CoCr), titanové slitiny (Ti6Al4V), Inconelu (718 a 625) a vysoko-pevnostní oceli [25]. Pro výrobu byla vybrána v hodinářském průmyslu běžně používaná nerezová ocel 316L. Na základě zvolení tohoto materiálu byla tloušťka vrstvy 50  $\mu\text{m}$ . Tato technologie však nedokáže docílit tak kvalitního povrchu, rozměrová přesnost je  $\pm 0,3$  mm a parametr drsnosti povrchu  $R_a > 8$   $\mu\text{m}$ . Bylo tedy nutné přidat přídavek na obrábění na funkční plochy.

Celý proces výroby začal nahráním modelů ve formátu .stl do softwarového nástroje QuantAM. Následovala orientace modelů v pracovní komoře, generování nezbytných podpor a umístění na desku. Program poté vytvořil soubor stavby dílů pro přenos do řídicího systému stroje.

Po přenosu souboru do stroje se z pracovní komory odsál kyslík a vpustil ochranný plyn argon. Nastala fáze samotného tisku po jednotlivých vrstvách. Po dokončení tisku se v komoře opět vyměnily plyny, komora se otevřela, bylo provedeno odebrání nespečeného prášku a mechanické odstranění podpor. Na obr. 2.11 jsou modely těsně po vytisknutí a na obr. 2.12 jsou modely po odstranění podpor.



Obr. 2.11 Tisk Renishaw AM 400.

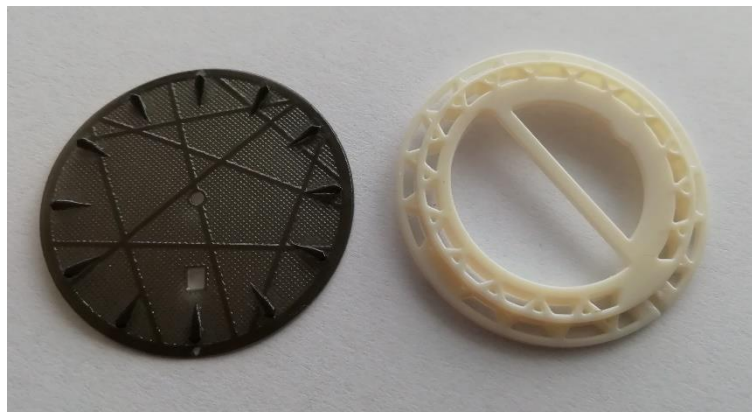


Obr. 2.12 Díly vytištěné pomocí SLM.

### 2.2.2 Tisk na PolyJet zařízení

Modely klece a ciferníku byli vytištěny na zařízení Stratasys J750 s pracovním prostorem 490 x 390 x 200 mm. Tato tiskárna umožňuje tisk ze šesti materiálů najednou. Lze kombinovat pevné, pružné, průsvitné a tepelně odolné materiály v 500 000 odstínech [26].

Modely byly na tisk připraveny v programu GrabCAD Print, ve kterém proběhlo umístění na pracovní podložku, definování materiálu, barvy a tloušťky vrstvy 14  $\mu\text{m}$ . Program vypočítal dobu tisku a množství materiálu potřebného na tisk modelů a podpor. Poté byly informace odeslány do tiskárny a výroba byla zahájena. Po dokončení byly modely odloupnuty z podložky a podpory byly odstraněny proudem vody. Výsledek je na obr. 2.13.



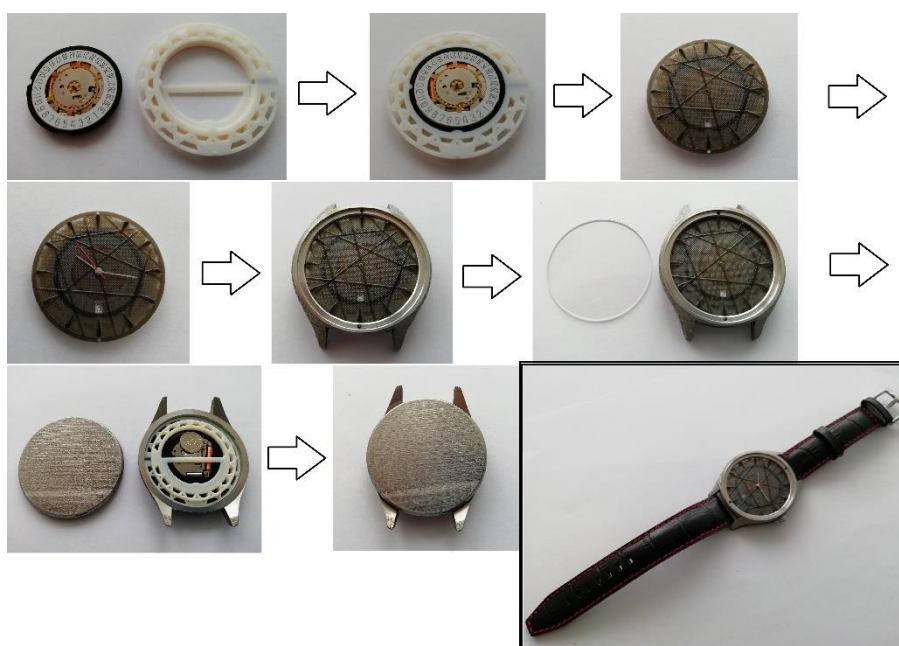
Obr. 2.13 Tisk pomocí PolyJet.

### 2.2.3 Dokončovací operace

U modelů vytisknutých z kovu bylo nutné provést soustružení funkčních průměrů. Tato operace byla provedena na univerzálním soustruhu za použití čtyřčelistového sklíčidla a nože s vyměnitelnou břitovou destičkou tvaru D a poloměrem zaoblení špičky 0,2 mm. Poté proběhlo broušení brusnými papíry P240 a P600.

### 2.3 Montáž hodinek

Celý průběh montáže je znázorněn na obr. 2.14. Vložení strojku do klece, nasazení ciferníku, nalisování ručiček, vložení do pouzdra, nasazení korunkového hřídele s korunkou, namáčknutí víčka, nalepení sklíčka, připevnění řemínku pomocí stěžejek.



Obr. 2.14 Montáž.

### 3 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

#### 3.1 Výrobní náklady

Pro vyhodnocení nákladů a výrobního času byla vytvořena tab. 3.1. V prvním sloupci je název vyhodnocované operace v chronologickém pořadí nebo název nakupovaného dílu. Ve druhém sloupci je čas potřebný na danou operaci a ve třetím je cena dané operace či cena nakupovaného dílu. Pro výpočet nákladů na práci člověka byla použita částka 150 Kč/hod. Ceny za tisk jsou dány dodavatelem a je v nich zahrnut provoz stroje, potřebné množství materiálu, ale neobsahují náklady na obsluhu, proto byla tab. 3.1 o tyto náklady doplněna. Náklady na návrh produktu a jeho expedici nejsou zahrnuty.

Tab. 3.1 Náklady.

Operace/nakupovaný díl	Čas [hod]	Cena [Kč]
Příprava SLM tisku	0,50	75
Tisk SLM	6,00	10 240
Odstranění podpor a čištění tiskárny	0,25	38
Soustružení včetně obsluhy	1,25	388
Broušení	0,75	113
Brusný papír	-	24
Příprava PolyJet tisku	0,25	38
Tisk PolyJet	0,50	564
Odstranění podpor a čištění tiskárny	0,25	38
Strojek	-	625
Skříčko	-	150
Řemínek	-	600
Ručičky	-	180
Korunka	-	220
Stěžečky	-	120
Montáž	0,50	75
<b>Celkový čas a náklady</b>	<b>10,25</b>	<b>13 488</b>

#### 3.2 Srovnání s aktuálně používanými metodami

Hlavní aktuálně používanou metodou pro výrobu pouzdra je frézování v obráběcím centru. Pro porovnání s touto metodou byla vytvořena poptávka na výrobu pouzdra a víčka ze stejné korozivzdorné oceli u české firmy zabývající se zakázkovou výrobou na pětiosém obráběcím centru. Nacenění bylo vyčísleno na částku 3 600 Kč za výrobu a 800 Kč za vytvoření programu, celková cena by byla 4 400 Kč za zhotovení. Odhadovaný výrobní čas jsou 2 hodiny.

Velikou výhodou 3D tisku, v případě použití zařízení Renishaw AM 400, je, že se dá vyrobit až 12 kusů navrhnutých pouzder s víčky najednou. Ve výsledku to znamená produktivitu 2 kusy/hod. V porovnání s konvenční výrobou, kde se dá vyrábět pouze každý kus zvlášť, to znamená 4x větší produktivitu.

Standardní obráběcí centra ovšem dokáží vyrábět díly s přesností 0,001 mm, což je o dva řády lepší přesnost než u SLM metody. Další parametrem srovnání je výsledná drsnost povrchu. Obráběcí centra dosahují při čelním frázování drsnosti 0,8  $\mu\text{m}$ , ale SLM tiskem lze dosáhnout pouze drsnosti 8  $\mu\text{m}$ , což je o jeden řád horší.



---

## ZÁVĚR

V této práci je rozebrána výroba hodinek pomocí 3D tisku. Jsou popsány jednotlivé etapy od základní skici až po finální montáž.

Cíl, snížení odpadního materiálu a s ním spojených nákladů, byl splněn. Z tisku SLM metodou není žádný odpadní materiál, nespečený prášek se využije na další tisk. Tato technologie umožňuje výrobu i z jiných materiálů než korozivzdorné oceli 316L, která zde byla použita. Například z titanové slitiny Ti6Al4V, která se na výrobu pouzder také hodně používá. V případě PolyJet tisku je odpadním materiálem vodou rozpustný materiál podpor, který je po tisku odstraněn proudem vody. Po přefiltrování tvoří tento odpad pouze nepatrné množství.

Výhodou je možnost výroby tvarově složitých dílů, které by byly za použití konvenčních metod nevyrobitelné. Lze tedy poskytnout designérům jistou volnost a umožnit výrobu extravagantních modelů různých tvarů. Tato skutečnost může v budoucnu úplně změnit klasický koncept hodinek. V případě PolyJet tisku je obrovskou výhodou velmi detailní tisk v mnoha barevných odstínech za použití několika různých materiálů. V této práci byl detailní tisk demonstrován na výrobě ciferníku.

Nevýhodou je, že současná úroveň metody SLM neumožňuje výrobu pouzdra hodinek bez potřeby dalších dokončovacích operací. V hodinářském průmyslu, kde jsou vysoké nároky na přesnost, je potřeba obrobit či zbrousit funkční a dosedací plochy. To znamená, že pro výrobu dílů tohoto typu je zapotřebí pořízení mimo samotné tiskárny také alespoň soustruh.

Technické zhodnocení ukazuje, že při výrobě jednoho kusu je výhodnější použít současnou technologii. Ale v případě sériové výroby se ukázala jako mnohem výhodnější technologie RP, která dokáže zvýšit produktivitu o 300 %.

Z ekonomického hlediska je v případě sériové výroby opět výhodnější 3D tisk, kterým lze cenu jednoho pouzdra vyčíslit na přibližně 2 000 Kč. Této částky nelze samotným obráběním dosáhnout.

Předností této technologie, hovořící také pro její zařazení do hodinářské firmy, je možnost výroby pouzder různých modelových řad najednou podle aktuální potřeby trhu, a to bez jakékoliv změny nástroje. Není tedy nutné vyrábět jednotlivé modelové řady zvlášť ve výrobních dávkách.

Po prozkoumání celého procesu se tato technologie jeví jako velmi výhodná i přesto, že není možné dosáhnout takové přesnosti a drsnosti povrchu jako u frézování. Prostřednictvím této práce je navrhováno výrobcům, aby zvážili pořízení vlastní tiskárny a přechod na tuto technologii výroby. Mimo zefektivnění výroby je tato technologie odlišná od ostatních a zajistí jim určitou prestiž a marketing.

---

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] DOHRN-VAN ROSSUM, G. *History of the hour: Clocks and modern temporal orders* [online]. Přeložil: Thomas Dunlap. Londýn: The University of Chicago Press, 1996. [cit. 7.3.2019]. Dostupné z: [https://books.google.cz/books?id=xYhINoUu-toC&pg=PA122&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.cz/books?id=xYhINoUu-toC&pg=PA122&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
- [2] *PHN-Watch 1505* [online]. [cit. 11.4.2019]. Dostupné z: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/94/PHN\\_-\\_Watch\\_1505.jpeg/1280px-PHN\\_-\\_Watch\\_1505.jpeg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/94/PHN_-_Watch_1505.jpeg/1280px-PHN_-_Watch_1505.jpeg)
- [3] HARRISON, J. *The principles of Mr. Harrison's time-keeper: With plates of the same* [online]. 1767. [cit. 7.3.2019]. Dostupné z: <https://archive.org/details/principlesmrhar00unkngoog/page/n4>
- [4] BROZEK, J. E. The History and Evolution of the Wristwatch [online]. *International Watch Magazine*. St. Petersburg: InfoQuest Publishing, 2004. [cit. 9.3.2019]. Dostupné z: [http://www.qualitytyme.net/pages/rolex\\_articles/history\\_of\\_wristwatch.html](http://www.qualitytyme.net/pages/rolex_articles/history_of_wristwatch.html)
- [5] STEPHENS, C., DENNIS, M. Engineering time: Inventing the electronic wristwatch [online]. *British Journal for the History of Science*. 2000. [cit. 29.3.2019]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20151013191116/http://www.ieee-uffc.org/main/history/step.pdf>
- [6] NIST. *Radio Station WWVB* [online]. [cit. 29.3.2019]. Dostupné z: <https://www.nist.gov/pml/time-and-frequency-division/radio-stations/wwvb>
- [7] SEIKO. [online]. [cit. 29.3.2019]. Dostupné z: <https://www.seikowatches.com/global-en>
- [8] TOVYS. *Mechanismus strojků* [online]. [cit. 21.3.2019]. Dostupné z: <https://www.tovys.cz/clanky/dalsi-informace/hodinarske-informace/mechanizmus-strojku.html>
- [9] TOVYS. *Mechanické hodinky* [online]. [cit. 21.3.2019]. Dostupné z: <https://www.tovys.cz/clanky/vse-o-hodinkach/mechanicke-hodinky.html>
- [10] *Parts and components of mechanical watch* [online]. [cit. 5.4.2019] Dostupné z: <https://i2.wp.com/www.owoodwatch.com/wp-content/uploads/2018/01/Parts-and-components-of-mechanical-watch.png>
- [11] TOVYS. *Quartzové hodinky* [online]. [cit. 21.3.2019]. Dostupné z: <https://www.tovys.cz/clanky/vse-o-hodinkach/quartzove-hodinky.html>
- [12] *Quartz watch* [online]. [cit. 5.4.2019]. Dostupné z: <https://composter.com.ua/images/NOVA/quartz-watch.png>
- [13] TOVYS. *Materiály pouzder* [online]. [cit. 21.3.2019]. Dostupné z: <https://www.tovys.cz/clanky/vse-o-hodinkach/materialy-pouzder.html>
- [14] *3D process 2* [online]. [cit. 5.4.2019]. Dostupné z: <http://bluechipinfocorp.com/wp-content/uploads/2018/04/3d-process-2.jpg>
- [15] SEDLÁK, J. *Aditivní technologie* [přednáška]. Brno: Fakulta strojního inženýrství VUT

- 
- [16] SEDLÁK, J. *Aditivní technologie* [cvičení]. Brno: Fakulta strojního inženýrství VUT.
- [17] *Basic principle of stereolithography apparatus method* [online]. [cit. 5.4.2019]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Basic-principle-of-stereolithography-apparatus-method\\_fig3\\_297605485](https://www.researchgate.net/figure/Basic-principle-of-stereolithography-apparatus-method_fig3_297605485)
- [18] MMSPEKTRUM. *Stereolitografie a Selective laser sintering* [online]. [cit. 23.3.2019]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-rapid-prototypingu.html>
- [19] *AM%2B2* [online]. [cit. 5.4.2019]. Dostupné z: <https://4.bp.blogspot.com/-rkXGghvBX-g/W1YtxMoxEUI/AAAAAAAAA1w/JBB4YnPUiBA1d2B0XNBPEybHaRGteg7VACEwYBhgL/s1600/AM%2B2.jpg>
- [20] BENIAK, J. *Systémy Rapid Prototyping*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v nakladatelství STU, 2014. ISBN 978-80-227-4287-0.
- [21] MATERIALISE. *3D tisk kovů* [online]. [cit. 23.3.2019]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/3d-tisk-kovu>
- [22] *Powder Bed Fusion Pro 1* [online]. [cit. 5.4.2019]. Dostupné z: [https://3dprint.com/wp-content/uploads/2017/11/Powder\\_Bed\\_Fusion\\_Pro-1.png](https://3dprint.com/wp-content/uploads/2017/11/Powder_Bed_Fusion_Pro-1.png)
- [23] MATERIALISE. *PolyJet* [online]. [cit. 23.3.2019]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/polyjet>
- [24] *Material Jetting 3D Printer* [online]. [cit. 5.4.2019]. Dostupné z: <https://best3dprinter.org/wp-content/uploads/2017/10/Material-Jetting-3D-Printer.jpg>
- [25] Renishaw. *AM 400* [online]. [cit. 11.4.2019]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/am-400--35456>
- [26] MCAE. *Stratasys J750 a J735* [online]. [cit. 11.4.2019]. Dostupné z: <https://www.mcae.cz/cs/produkty/stratasys-j750-j735/>



## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
.stl	datový formát
2D	2-dimensional
3D	3-dimensional
ABS	Akrylonitrilbtadienstyren
atd.	a tak dále
CAD	Computer Aided Design
FDM	Fused Deposition Modeling
GPS	Global Positioning Systém
např.	například
PVD	Physical Vapour Deposition
RE	Reverse Engineering
RP	Rapid Prototyping
SLA	Stereolithography
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selactive Laser Sintering
SM	Swiss Made
SP	Swiss Parts
UV	Ultraviolet